Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 16, No. 5, Dec- Jan 2021, p. 525-540

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد 16، شماره 5، آذر - دی 1399، ص. 540-525

مقاله علمی-پژوهشی

تولید شکلات حبابدار و استفاده از مقطع‌نگاری اشعه X و پردازش تصویر در بررسی ویژگی‌های حباب‌ها

مسیح سرفرازی[1]- محبت محبی[2*]- مهدی سعادتمند طرزجان[3]- علی میرشاهی[4]

تاریخ دریافت: 1398/08/06
تاریخ پذیرش: 1398/08/18

چکیده

در ایـن مطالعـه، شـکر بـا مخلـوط اینـولین: مالتودکسـترین در نسـبت‌هـای 75:25 (CH2)، 50:50 (CH3) و 25:75 (CH4) جـایگزین شـد. سـپس گاز دی‌اکسید کربن در فشار 6 بار به این سه شکلات علاوه بر شـکلات حـاوی شـکر (CH1) تزریـق شـد تـا شـکلات حبابـدار تولیـد شـود. بـا اسـتفاده از مقطع‌نگاری اشعه X از شکلات‌هـای حبابـدار تصـویربرداری شـد و پـس از پـردازش، تصـاویر بـه‌دسـت آمـده بـا اسـتفاده از روش چـان-وز تقطیـع شـدند؛ یعنی، حباب‌ها از سایر قسمت‌های تصویر جدا شدند. ویژگی‌هـای حبـاب‌هـا کـه در ایـن تحقیـق مـورد بررسـی قـرار گرفتنـد عبـارت بودنـد از: حجـم کـل، قطر و نسبت سطح به حجم. همچنین، بلورینگی، چگالی و سختی شـکلات‌هـا نیـز بـا هـم مقایسـه شـدند. نتـایج نشـان دادنـد کـه روش چـان-وز توانسـت نویزهای موجود در تصویر را حذف کنـد. همچنـین، نتـایج پـراش اشـعه X نشـان داد کـه نمـودار CH3 قلـه‌هـای تیزتـری نسـبت بـه CH2 و CH4 دارد که این نشانی از بلورینگی بیشتر آن بود. میانگین قطر حبـاب‌هـای CH1 بیشـتر از سـایر نمونـه‌هـا بـود کـه دلیـل آن را مـی‌تـوان بـه بلـورینگی بیشـتر آن در مقایسه با نمونه‌های بدون شکر نسبت داد؛ زیرا سـاختار متبلـور CH1 از خـروج گـاز جلـوگیری کـرده و موجـب بـه‌هـم پیوسـتن حبـاب هـای کوچـک و تشکیل حباب‌های بزرگتر شده است. همچنین، مشاهده شد که در تمـام شـکلات‌هـا، چگـالی شـکلات حبابـدار کمتـر از شـکلات بـدون حبـاب اسـت؛ زیـرا بخشی از مواد جامد و چربـی بـا گـاز دی‌اکسـید کـربن جـایگزین شـد. نتـایج انـدازه‌گیـری سـختی نیـز نشـان داد کـه نمونـه‌هـای بـدون شـکر حبابـدار از نمونه‌های بدون گاز نرمتر بودند ولی در مورد CH1 عکس این پدیـده مشـاهده شـد کـه دلیـل آن را مـی‌تـوان بـه حضـور شـکر در ایـن نمونـه نسـبت داد؛ زیرا در محصولات حبابدار، ذرات جامد، به‌ویژه شکر، یک اسکلت پیوسـته را تشـکیل مـی‌دهنـد و همـان نقشـی را ایفـا مـی‌کننـد کـه چربـی در محصـولات بدون حباب بازی می‌کند

واژه‌های کلیدی: اینولین، مالتودکسترین، مقطع‌نگاری اشعه X، پراش اشعه X، چان-وز، سختی.

مقدمه

شـکلات سوسپانسـیونی از ذرات جامـد، شـامل شـکر، پـودر کاکائو و پودر شیر (بسـته بـه نـوع شـکلات) در فـاز چربـی، شـامل کره کاکائو یا جـایگزین هـای آن مـی باشـد. ذرات جامـد و چربـی بـه ترتیـب تقریبـا 70 و 30 درصـد جـرم شـکلات را بـه‌خـود اختصاص می‌دهند. شکلات اساسا بـه سـه دسـته تیـره، شـیری و سـفید تقسـیم مـی‌شـود (Afoakwa *et al*., 2007). شـکر تقریبـا 40-50 درصد ذرات جامد شـکلات را بـه‌خـود اختصـاص مـی‌دهـد؛ در نتیجـه، اثـر بـه‌سـزایی بـر روی شـیرینی، توزیـع انـدازه ذرات و خـواص رئولـوژیکی و حسـی آن دارد Sokmen and Gunes, (2006). در عـین حـال، هـر 100 گـرم شـکر آسـیاب شـده 394 کیلوکـالری انـرژی تولیـد مـی‌کنـد (Aidoo *et al*,. 2015) و مصرف زیاد شکلات منجـر بـه پوسـیدگی دنـدان، دیابـت و چـاقی مـی‌شـود (Pandey and Singh, 2011)؛ بنـابراین، امـروزه مصـرف‌کننـدگان بـه میـزان فزاینـده‌ای نگـران شـکر موجـود در شـکلات و محتـوای انـرژی آن هسـتند (Aidoo *et al*,. 2013). مـی‌تـوان ایـن مشـکل را از طریـق جـایگزین کـردن شـکر بـا شـیرین‌کننـده‌هـای تـوده ای[5] (مغـذی) و/ یـا فیبرهـای رژیمـی برطـرف کـرد. شـیرین‌کننـده‌هـای تـوده‌ای شـامل قنـد-الکـل‌هـا (پلـی-ال‌هـا) مـی‌باشـند کـه عبارتنـد از: سـوربیتول، زایلیتـول،

1و 2- به‌ترتیب دانشجوی دکتری و استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.
3- دانشیار، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.
4- دانشیار، گروه علوم درمانگاهی، دانشکده دامپزشکی، دانشگاه فردوسی مشهد.
(*- نویسنده مسئول: Email: mohebbatm@gmail.com)
DOI: 10.22067/ifstrj.v16i5.83979
5 Bulk sweeteners

اریتریتول، لاکتیتول، مانیتول، ایزومالت و مالتیتول. تری هالوز، تاگاتوز و ایزومالتوز نیز از نظر عملکرد شبیه قند-الکل‌ها هستند ولی در واقع جزء قندها دسته‌بندی می‌شوند و قند-الکل نیستند (Afoakwa *et al*,. 2007; Aidoo *et al*,. 2013). فیبرهای رژیمی، کربوهیدارت‌هایی با منشا گیاهی، به ندرت در روده کوچک انسان جذب می‌شوند؛ در عین حال، فلور طبیعی روده بزرگ می‌تواند آن‌ها را تخمیر کند. ادعا می‌شود که این ترکیبات موجب ارتقاء سلامتی انسان می‌شوند؛ به همین دلیل، غذاهای سرشار از فیبرهای رژیمی طی سال‌های اخیر توجه مصرف‌کنندگان را به‌خود جلب کرده‌اند. خواص سلامتی‌بخشی این ترکیبات عبارتند از: محتوای انرژی زایی پایین، جلوگیری از یبوست، کاهش خطر سرطان روده بزرگ، بیماری‌های قلبی و کلسترول خون (Erdem *et al*,. 2014; Shoaib *et al*,. 2016). اینولین، مالتودکسترین، پلی‌دکستروز و کربوکسی‌متیل سلولز از رایج‌ترین فیبرهای رژیمی هستند که به مواد غذایی، از جمله شکلات، افزوده می‌شوند. به دلیل شدت کمتر شیرینی این ترکیبات نسبت به شکر، باید آنها را در شکلات با یک شیرین‌کننده شدید[1] (غیرمغذی) مثل سوکرالوز یا استویا همراه کرد که صدها تا هزاران برابر شیرین تر از شکر می باشند.

حباب‌ها در بسیاری از محصولات غذایی از جمله کیک‌ها، شکلات‌ها و نوشیدنی‌ها یافت می‌شوند. آنها اگرچه به ارزش تغذیه‌ای مواد غذایی نمی‌افزایند، ویژگی‌های بافتی مواد غذایی و احساس دهانی حاصل از خوردن آنها را تغییر می‌دهند. از جمله این ویژگی‌ها می توان به تردی یا خامه‌ای بودن شکلات حبابدار، احساس دهانی سبک[2] خامه هم‌زده و اسفنجی بودن کیک یا نان اشاره کرد. همچنین، محصولات هوادار در حجم یکسان، انرژی کمتری نسبت به محصولات مشابه دارند و می‌توان از این منظر نیز به آنها توجه کرد (Haedelt *et al*,. 2007)؛ به علاوه، حباب‌ها به تنظیم رهایش طعم در دهان نیز کمک می‌کنند (Haedelt *et al*,. 2005). در شکلات‌های معمولی، چربی فاز پیوسته است که تمام اجزاء را در کنار هم نگه می‌دارد ولی در محصولات حبابدار، ذرات جامد، به‌ویژه شکر، با ایجاد یک اسکلت پیوسته، این وظیفه را به عهده دارند. این امر امکان تولید محصولات کم‌چرب را نیز فراهم می‌آورد (Peters, 2017). شکلات حبابدار چگالی کمتری نسبت به شکلات های معمولی دارد؛ زیرا بخشی از مواد جامد و چربی با گاز جایگزین می‌شود. این منجر به تولید محصولی با حجم بیشتر در جرم یکسان، بافت نرم‌تر و ذوب سریع‌تر می‌شود. حباب‌ها معمولا با چشم دیده می‌شوند و میانگین قطر آنها در بازه 0/05-3 mm قرار می‌گیرد (Peters, 2017). در شرایط ایده‌آل، اندازه حباب‌ها باید یکسان باشد (Haedelt, 2005). چنین محصولی را می‌توان تحت خلاء یا فشار بالا تولید کرد. همچنین، می‌توان تزریق گاز را از طریق اکستروژن شکلات نیمه‌جامد یا جامد انجام داد. جزء حجمی گاز و توزیع اندازه حباب‌ها از مهم‌ترین ویژگی‌های این شکلات‌ها می‌باشند. این ویژگی‌ها اثر قابل ملاحظه‌ای بر هزینه‌های تولید و ویژگی‌های حسی این محصولات دارند؛ بنابراین، باید در حین تولید و به صورت برخط مورد نظارت و ارزیابی قرار گیرند. روش‌های رایج نظارت بر توزیع اندازه حباب‌ها در این محصولات شامل برداشتن محصول از خط تولید، شکستن آنها و مشاهده توزیع اندازه حباب‌ها می‌باشد. این روش از حالت ایده‌آل فاصله بسیار زیادی دارد؛ زیرا بررسی حباب‌ها کاملا سلیقه‌ای می‌باشد. به همین دلیل، به روشی نیاز است که بتواند بر توزیع اندازه حباب‌ها به‌صورت روی خط نظارت کند تا بدین طریق فرایند تولید بهینه‌سازی، یکنواختی محصول حفظ و میزان ضایعات آن کمینه شود (Watson *et al*,. 2014).

با وجود مزایای بسیار زیاد، روش‌های تصویربرداری[3] معایبی هم دارند که نباید آنها را نادیده گرفت. پیش از همه، بسیاری از این روش‌ها به آماده‌سازی نمونه احتیاج دارند که این امر ممکن است نتایج غیرواقعی را با خود به دنبال داشته باشد. این جنبه باید در نظر گرفته شود تا از نتیجه‌گیری‌های اشتباه در بررسی ریزساختار جلوگیری شود؛ به علاوه، برخی روش‌های تصویربرداری، به‌دلیل استفاده از تجهیزات پیچیده، هزینه بسیار بالایی دارند و از آنها فقط در مواد غذایی گران قیمت می‌توان استفاده کرد (Falcone *et al*,. 2004). مقطع‌نگاری اشعه X (CT^4) یک روش تصویربرداری سه بعدی است که تصاویری از مقاطع عرضی نمونه تهیه می‌کند. این روش برای بصری‌سازی و اندازه‌گیری غیرمخرب ریزساختار مواد به‌کار می‌رود. در این روش، مجموعه‌ای از رادیوگراف‌های یک نمونه، با استفاده از اشعه X از زوایای مختلف تهیه می‌شود تا برای بازسازی سه‌بعدی ریزساختار ماده استفاده شود.

هدف از این پژوهش تولید شکلات بدون شکر حبابدار با استفاده از اینولین و مالتودکسترین، به‌عنوان جایگزین‌های شکر، و گاز دی‌اکسید کربن می‌باشد. همچنین، در این مطالعه، از مقطع‌نگاری اشعه X و پردازش تصویر برای بررسی توزیع و

1 Intense sweetener
2 Light mouth-feel
3 Imaging
4 Computed tomography

ویژگی‌های حباب‌ها استفاده شد؛ به‌علاوه، سختی و چگالی شکلات‌های حبابدار و بدون گاز نیز با هم مقایسه شدند.

مواد و روش‌ها

مواد استفاده شده در این پژوهش از شرکت‌های ذیل تهیه شدند: پودر کاکائو (Altinmarka، ترکیه)، جایگزین کره کاکائو (CBS[1]) (Fuji Oil Holdings، سنگاپور)، لستیتین سویا (بهپاک بهشهر، ایران)، پودر شیر بی‌چربی (نصر دالیا، ایران)، اینولین تجاری (Frutafit TEX) (Sensus، هلند)، مالتودکسترین تجاری (DE =14-16) (فرایند بیوتکنولوژی، ایران)، شکر قنادی (ایران شکر، ایران) و سوکرالوز (Tate & Lyle، بریتانیا). ارزیابی حسی اولیه نشان داد (داده‌ها گزارش نشده‌اند) که نمونه‌های حاوی مالتودکسترین با DE= 14-16، در مقایسه با نمونه‌های حاوی مالتودکسترین با DE =10-12 و DE =18-20، خواصی حسی بهتری داشتند.

تولید شکلات

شکلات شیری بر اساس پژوهش Farzanmehr و Abbasi (2009) با اندکی تغییر تولید شد. ابتدا CBS در دمای 45°C ذوب شد و سپس پودر کاکائو، شکر یا جایگزین‌های آن و پودر شیر به آن اضافه شدند. پس از اختلاط اولیه، لستیتین نیز به مخلوط فوق اضافه شد. سوکرالوز نیز به‌عنوان شیرین‌کننده در سه نمونه بدون شکر استفاده شد. تمام نمونه‌ها در بهرهای 10 کیلویی با استفاده از آسیاب ساچمه‌ای کارگاهی (سپهر ماشین، ایران) تهیه شدند. آسیاب مواد با سرعت 100 دور بر دقیقه در دمای 45°C به مدت دو ساعت انجام شد. یک پمپ توده شکلات را با شدت جریان 3-2 کیلوگرم بر دقیقه به گردش در می‌آورد. نسبت های جرمی شکر، اینولین و مالتودکسترین در جدول 1 نشان داده شده‌اند.

جدول 1-نسبت‌های جرمی شکر، اینولین و مالتودکسترین در نمونه‌های شکلات.

نمونه‌ها	شکر	اینولین	مالتودکسترین
CH1	100	-	-
CH2	-	25	75
CH3	-	50	50
CH4	-	75	25

پراش اشعه X

بلورینگی[2] نمونه‌ها با استفاده از دستگاه پراش اشعه X (Explorer، GNR, Analytical Instruments، ایتالیا) بررسی شد. این دستگاه با تابش CuKα (λ= 1.54 Å) در ولتاژ 40 kV و جریان 30 mA کار می‌کند. زاویه پراش (2θ) در بازه 60-5 درجه در گام‌های 0/05 درجه‌ای در نظر گرفته شد.

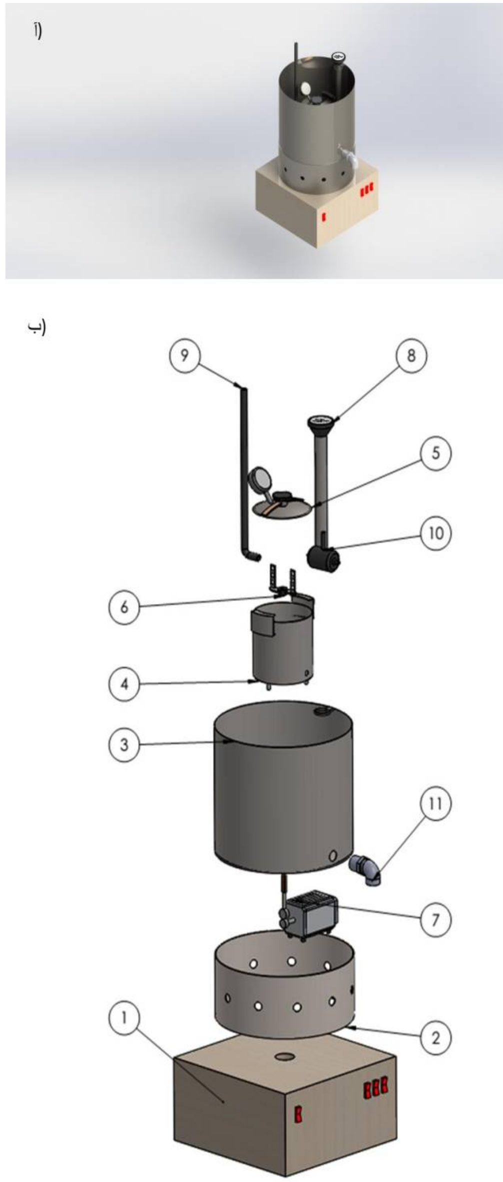
تزریق گاز به شکلات

برای این کار یک دستگاه ساخته شد که توصیف آن به شرح ذیل می‌باشد (شکل 1 آ و ب): این دستگاه متشکل از دو مخزن استوانه‌ای استیل 304، یک موتور، یک گرمکن و یک پمپ می‌باشد. مخزن خارجی (شماره 3) نقش یک حمام آب را ایفا می‌کند که دمای آب درون آن به‌وسیله یک گرمکن الکتریکی میله‌ای (شماره 8) افزایش می‌یابد. آب درون این مخزن به‌وسیله یک پمپ (شماره 10) به گردش در می‌آید. شکلات به داخل مخزن داخلی (شماره 4) ریخته می‌شود. پس از بستن درپوش (شماره 5) و آب بند کردن مخزن داخلی، گاز از طریق لوله (شماره 9) به داخل آن تزریق می‌شود تا فشار داخل مخزن به فشار مد نظر برسد. لازم به ذکر است که یک فشارسنج روی درپوش مخزن داخلی تعبیه شده است تا بتوان فشار داخل مخزن را به‌وسیله آن مشاهده کرد. برای توزیع یکنواخت گاز در شکلات، موتور (شماره 9) - که شافت خروجی آن از قسمت تحتانی وارد مخزن داخلی شده است- به‌طور مداوم شکلات را هم می‌زند. لازم به ذکر است که برای ایجاد جریان متلاطم در شکلات، چند سوراخ بر روی پره‌های (شماره 6) موتور ایجاد شده‌اند. در پایان فرایند، شکلاتی که از گاز اشباع شده است، از طریق شیر تخلیه (شماره 11) با فشار بیش از یک اتمسفر از مخزن داخلی خارج می‌شود. تمامی تجهیزات برقی، اعم از سیم‌های برق پمپ، موتور و گرمکن،

1 Cocoa butter substitute

2 Crystallinity

در جعبه کنترل (شماره 1) قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، گاز دی‌اکسید کربن با فشار 6 بار به نمونه‌های شکلات تزریق شد.



شکل 1- آ) نقشه سه بعدی و ب) نقشه انفجاری دستگاه تزریق گاز به شکلات

مقطع‌نگاری اشعه X

تصاویر مقطع‌نگاری اشعه X از نمونه‌های شکلات با استفاده از دستگاه مقطع‌نگاری فک و صورت (Planmeca Promax، فنلاند) تهیه شدند. یک قالب از هر نمونه حباب‌دار و یک قالب شکلات تجاری برای تصویربرداری استفاده شدند و تصاویر با ولتاژ 90 کیلوولت، شدت جریان 6 میلی‌آمپر و ضخامت مقطع 0/8 میلی‌متر تهیه شدند.

پردازش و تقطیع تصاویر

این کار با استفاده از نرم‌افزار متلب نسخه R2018b (مثورکس، هلند) به صورت ذیل انجام شد: ابتدا سطوح روشنایی تصویر اولیه (شکل 3-الف) در بازه 1-0 نرمال شدند

(شکل 3-ب). پس از آن، از فیلتر لاپلاس[1] برای تیز کردن لبه‌های حباب ها استفاده شد (شکل 3-پ) و تصویر حاصل از فیلتر از تصویر قبل از فیلتر تفریق شد (شکل 3-ت). سپس، از روش آستانه‌یابی تطبیقی[2] (Bradley and Roth, 2007) برای به‌دست آوردن مرز اولیه (تصویر دودویی) استفاده شد (شکل 3-ث). مراحل فوق روی تمام تصاویر اجرا و تصاویر سطح خاکستری پردازش شده و تصاویر مرز اولیه در متغیرهای سه بعدی ذخیره شدند. سپس این متغیرها وارد تابع چان-وز[3] سه‌بعدی شدند تا تصویر دودویی سه‌بعدی نهایی (شکل 3-ج) که در آن حباب‌ها از سایر بخش‌های تصویر جدا شده‌اند، به‌دست آید. ویژگی‌هایی که از این تصویر استخراج شدند، عبارتند از: حجم کل، قطر و نسبت سطح به حجم حباب‌ها.

تابع چان-وز را می‌توان به‌طور خلاصه به‌صورت زیر تعریف کرد:

$$F(c_1,c_2,C) = \mu.\text{length}(C) + \lambda_1 \int |u_0(x.y) - c_1|^2 \, dxdy + \lambda_2 \int |u_0(x.y) - c_2|^2 \, dxdy \quad (1)$$

که در آن u_0 میانگین سطح روشنایی تصویر، C مرز اولیه و c_1 و c_2 میانگین سطح روشنایی تصویر به‌ترتیب در داخل و خارج C هستند. μ، λ_1 و λ_2 نیز پارامترهای ثابت می‌باشند که در این مطالعه، پس از آزمون و خطای فراوان، به‌ترتیب برابر 0/01، 0/1 و 1 در نظر گرفته شدند. هدف این روش کمینه‌سازی تابع فوق می‌باشد (Chan and Vese, 2001).

توزیع اندازه حباب‌ها

توزیع اندازه حباب‌های حاصل از فرایندهای اختلاط غیرمتقارن و چوله به راست هست که نشان‌دهنده لوگ-نرمال[4] بودن آن می‌باشد (Misra *et al*,. 2018; Belidlo *et al*,. 2006; Chiotellis *et al*,. 2003; Massey *et al*,. 2001). توزیع لوگ-نرمال نوعی توزیع پیوسته از یک متغیر تصادفی است که لگاریتم طبیعی (Ln) آن به‌طور نرمال توزیع شده است. معادله توزیع لوگ - نرمال آن به صورت زیر است:

$$f(D_i) = \frac{1}{D_i \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln D_i - \mu)^2}{2\sigma^2}\right);\ D_i > 0 \quad (2)$$

که در آن D_i قطر حباب‌ها، $f(D_i)$ تابع چگالی احتمال D_i، μ میانگین توزیع لوگ-نرمال و σ انحراف معیار توزیع لوگ-نرمال می‌باشند. همان‌طور که می‌دانیم، اگر توزیع داده‌ها نرمال نباشد، نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آماری آنها قابل اعتماد و معتبر نخواهند بود (Granato *et al*,. 2014)؛ بنابراین، به‌منظور مقایسه اندازه قطر حباب‌های نمونه‌های مختلف، ابتدا لگاریتم طبیعی آنها ($\ln D_i$) محاسبه شد و سپس، از آزمون چنددامنه‌ای توکی برای مقایسه میانگین آنها استفاده شد. همچنین، سه پارامتر D_{10} (مقداری که 10% داده‌ها از آن کوچکترند)، D_{50} (مقداری که 50% داده ها از آن کوچکترند) و D_{90} (مقداری که 90% داده ها از آن کوچکترند) نیز محاسبه و با هم مقایسه شدند.

اندازه گیری چگالی

چگالی شکلات جامد حبابدار از طریق روش شناوری[5] تعیین شد. مقداری شکلات حبابدار در یک ظرف قرار داده شد. سپس ظرف با آب 20°C پر شد. چگالی شکلات حبابدار از فرمول زیر به‌دست آمد:

$$\rho_f = \frac{\rho_w \times m_f}{m_f + m_c - m_a} \quad (3)$$

که در آن ρ_f چگالی شکلات حبابدار (g/cm³)، ρ_w چگالی آب (g/cm³)، m_f جرم شکلات حبابدار (g)، m_c جرم ظرف و آب (g)، و m_a جرم ظرف، آب و شکلات (g) می‌باشند (Haedelt *et al*,. 2005; Haedelt *et al*,. 2007; Niranjan and Silva, 2008).

اندازه‌گیری سختی

سختی نمونه های شکلات (70×52×14 mm³) با استفاده از دستگاه تحلیل گر بافت TA plus (Lloyd Instruments Ltd) (Load cell، بریتانیا) اندازه‌گیری شد. آزمون سوراخ کردن با استفاده از یک پروب ته صاف استوانه‌ای با قطر 2 mm و سلول بارگذاری[6] 50 N انجام شد. پروب هر نمونه را تا عمق 7 میلی‌متر (50 درصد ضخامت نمونه) با سرعت 1 mm/s در دمای محیط سوراخ کرد. نیروی محرکه[7] بر روی 5 گرم تنظیم شد. با استفاده از نرم افزار Nexygen (نسخه 4/5/1) که به دستگاه متصل بود، سختی نمونه‌ها به صورت بیشترین نیروی (N) احساس شده به‌وسیله پروب اندازه‌گیری شد. تمام آزمون‌ها با چهار بار تکرار انجام شدند.

1 Laplacian
2 Adaptive thresholding
3 Chan-Vese
4 Log-normal
5 Floatation method
6 Load cell
7 Trigger force

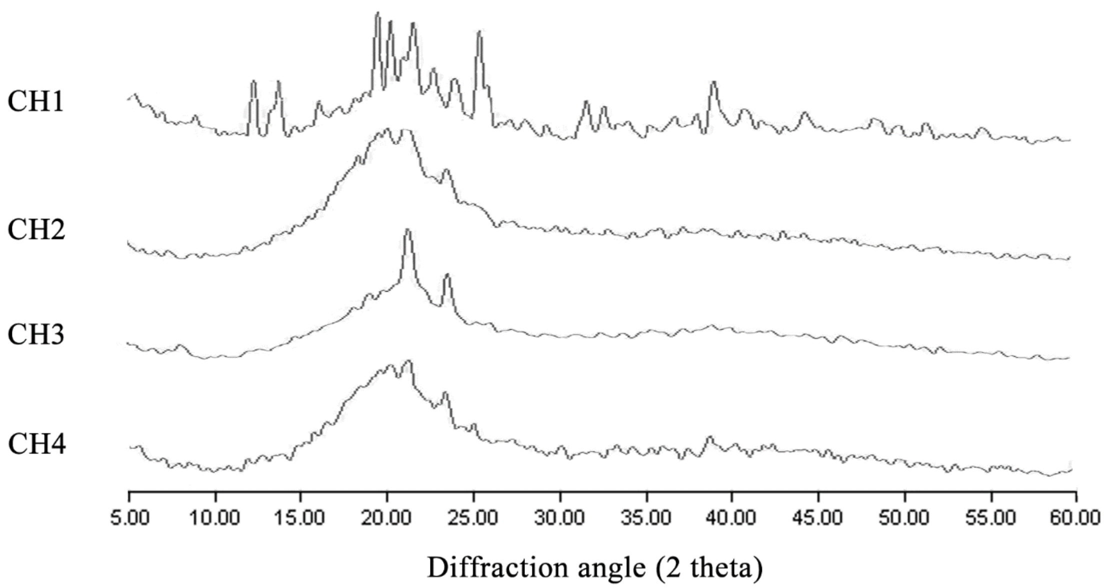
تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

با استفاده از نرم‌افزار مینی تب 18 (مینی تب، آمریکا) یک طرح آزمایشی کاملا تصادفی به روش فاکتوریل ایجاد شد. متغیرهای مستقل شامل درصد جایگزینی اینولین (جدول 1) و فشار گاز دی‌اکسید کربن (صفر و 6 بار) بودند. مدل خطی عمومی[8] برای بررسی اثرات اصلی و متقابل متغیرهای مستقل بر روی پاسخ‌ها مورد استفاده قرار گرفت. در مورد ویژگی‌های تصویری، فقط آزمون چنددامنه‌ای توکی به‌منظور مقایسه میانگین‌های آنها در سطح اطمینان 95 درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

پراش اشعه X

بلورینگی نمونه ها از طریق پراش اشعه X تعیین شد. همان‌طور که در شکل 2 نمایان است، تعداد زیادی قله‌های قوی و مشخص در نمودار CH1 مشاهده می‌شوند که می‌توان آنها را به میزان بالای بلورینگی شکر علاوه بر ناخالصی‌های موجود در شکر تجاری که در این پژوهش استفاده شد، نسبت داد. همچنین، باید خاطرنشان کرد که طی آسیاب کردن، ذرات شکر حرارت می‌بینند، سرد می‌شوند و می‌شکنند. این منجر به بازآرایی مولکولی در بلورهای شکر می‌شود و در نتیجه، ساختار بلورها را تغییر می‌دهد (Glicerina *et al*,. 2013). قله‌هایی که در 2θ برابر با 18/89، 19/64، 24/79 و 25/26 درجه مشاهده می‌شوند، نشان‌دهنده پودر شکر[9] هستند که به‌ترتیب متناظر با فواصل[10] 4/6975، 4/5200، 3/5916 و 3/5255 انگستروم می‌باشند (Winkelmeyer *et al*,. 2016). در مورد نمونه‌های بدون شکر، می‌توان دو قله مجزا را در 2θ برابر 21 و 23/5 درجه مشاهده نمود. به وضوح می‌توان دید که هر دو قله در نمودار CH3 بسیار قوی‌تر و مشخص‌تر هستند که نشان‌دهنده ساختار متبلورتر این نمونه می‌باشد. Aidoo و همکاران (2014) گزارش کردند که نمونه‌های شکلات بدون شکر با نسبت اینولین به پلی‌دکستروز 50 به 50 کریستال‌های بزرگتری در مقایسه با نمونه‌های 75 به 25 داشتند. به همین صورت، به‌نظر می رسد که اینولین و مالتودکسترین به صورت فیزیکی با یکدیگر یا با سایر اجزای شکلات، به‌خصوص CBS، برهمکنش داشته‌اند که در مورد CH3 ملموس‌تر بوده است؛ در نتیجه، ریزساختار شکلات دستخوش تغییراتی شد؛ از یک حالت نامنظم (بی‌شکل) به یک حالت منظم (متبلور). مقایسه نمودارهای CH2 و CH4 نشان می‌دهد که قله‌های مذکور اندکی در نمودار CH4 تیزتر هستند که نشانه ساختار متبلورتر CH4 نسبت به CH2 می‌باشد.



شکل 2- نمودارهای پراش اشعه X چهار نمونه شکلات

8 General linear model
9 Icing sugar
10 d-spacing

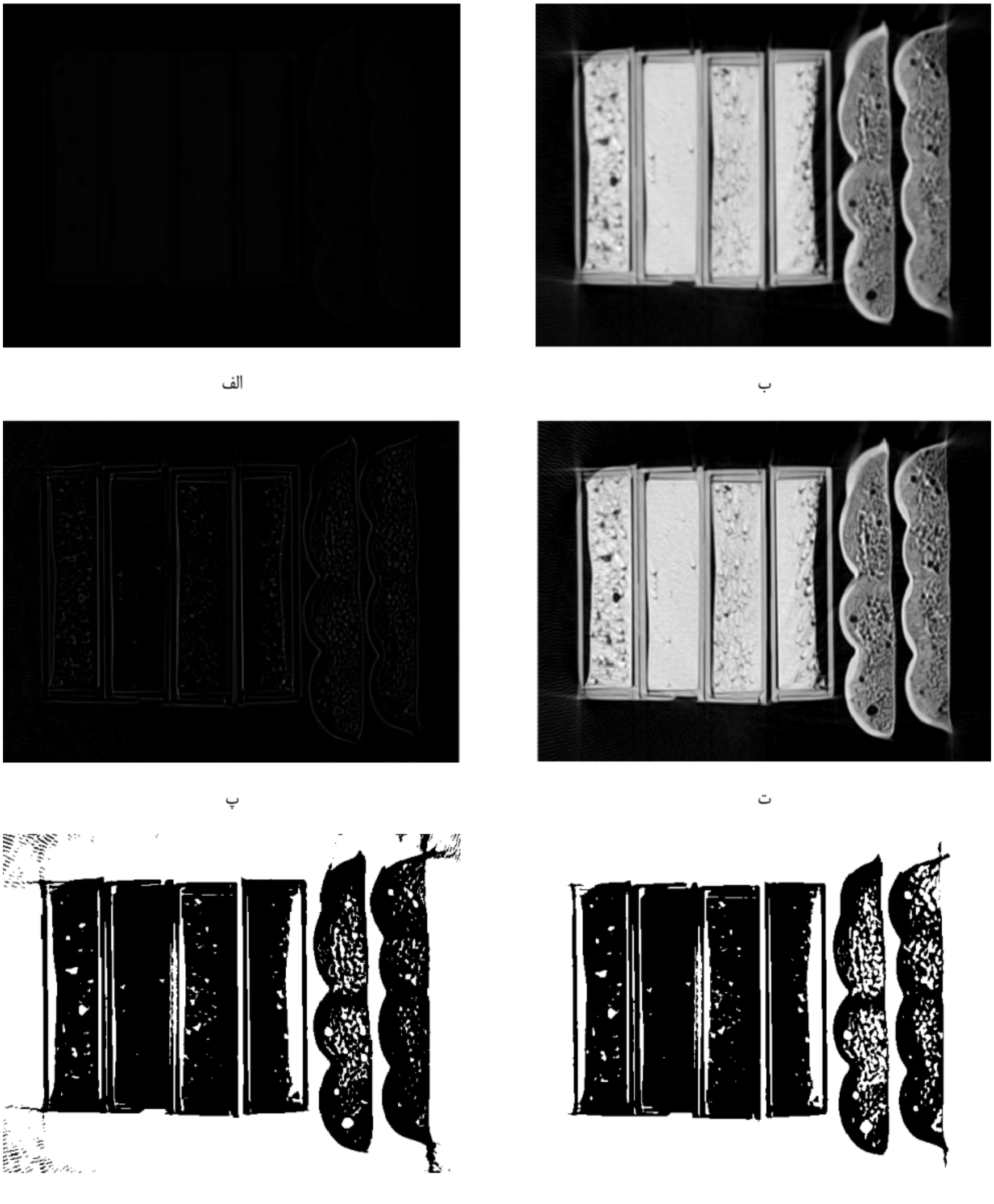
اثر درصد جایگزینی اینولین بر ویژگی‌های تصویری

در شکل 3 یکی از مقاطع تصویر سه‌بعدی نمونه‌های شکلات، مرز اولیه و تصویر دودویی نهایی حاصل از روش چان-وز مشاهده می‌شوند. به وضوح می‌توان دید که روش چان-وز از روش تطبیقی بهتر بوده، و به‌خوبی توانسته است نویزهای موجود در تصویر را حذف کند، در حالی که روش تطبیقی از این کار ناتوان بوده است. به علاوه، در تصویر شکلات‌های تجاری می‌توان مشاهده کرد که قطر حباب‌ها در تصویر دودویی نهایی بیشتر از مرز اولیه است. این مهم‌ترین ویژگی روش چان-وز است؛ زیرا در این روش، تقطیع تصویر وابسته به گرادیان نیست و به همین دلیل، برای ردیابی اجزایی مناسب است که مرزهای مشخصی ندارند (Chan and Vese, 2001). در تصویر شکلات‌های تجاری، چون لبه برخی از حباب‌ها دقیقا مشخص نیست، روش تطبیقی از تقطیع دقیق آنها ناتوان بوده است، در حالی که مرز اولیه در روش چان-وز تکامل یافته و توانسته است آن حباب‌ها را به‌خوبی از پس زمینه جدا کند.

همان طور که در شکل 4 مشاهده می‌شود، توزیع اندازه حباب‌های شکلات‌های مورد بررسی در این مطالعه به‌صورت لوگ-نرمال است؛ به همین دلیل، مقایسه میانگین بر روی لگاریتم طبیعی آنها صورت پذیرفت (جدول 2). ملاحظه می‌شود که در بین شکلات‌های تولید شده در این پژوهش، میانگین قطر حباب‌های CH1 بیشترین نزدیکی را به شکلات تجاری دارد و در بین شکلات‌های بدون شکر، قطر حباب‌های CH3 از دو نمونه دیگر بیشتر است. دلیل بزرگتر بودن اندازه حباب‌های CH1 نسبت به نمونه‌های بدون شکر را می‌توان به بلورینگی بیشتر آن نسبت داد (شکل 2). به‌نظر می‌رسد که بلورینگی بیشتر این نمونه سبب به دام‌انداختن حباب‌ها و جلوگیری از خروج گاز شده، و همین امر موجب به هم پیوستن[11] حباب های کوچک و تشکیل حباب‌های بزرگتر شده است. در بین نمونه‌های بدون شکر نیز قطر حباب‌های CH3 بیش از دو نمونه دیگر است که این پدیده را نیز می‌توان به ساختار متبلورتر آن نسبت داد. سه پارامتر D_{10}، D_{50} و D_{90} نیز در جدول 2 نشان داده شده‌اند. با مقایسه این سه پارامتر می‌توان دریافت که حباب‌های کوچک در هر چهار شکلات تولید شده در این تحقیق تقریبا هم اندازه‌اند و هر قدر اندازه حباب‌ها افزایش می‌یابد، اختلاف بین آنها بیشتر می‌شود. این امر نیز به نوبه خود نمایانگر به هم پیوستگی حباب‌ها در نمونه‌هایی است که ساختار متبلورتری دارند. به عبارت دیگر، در نمونه‌هایی همچون CH1 و CH3، چون حباب‌ها نتوانسته‌اند از ماتریس شکلات خارج شوند، به‌هم پیوسته‌اند و حباب‌های بزرگتری را تشکیل داده‌اند ولی در دو نمونه دیگر، به‌ویژه در CH2، به‌نظر می‌رسد که حباب‌ها به‌راحتی توانسته‌اند از ساختار شکلات خارج شوند؛ به همین دلیل، هم تعداد و هم قطر آنها در این دو نمونه نسبت به سایر نمونه‌ها کمتر است. شکل 4 نیز موید یافته‌های فوق می‌باشد. ملاحظه می‌شود که در بازه صفر تا تقریبا یک میلی‌متر، CH2 و CH1 به‌ترتیب دارای بیشترین و کمترین تعداد حباب می‌باشند، در حالی که در بازه 2/25 mm -1، حالت عکس آن صادق است. به‌علاوه، مشاهده می‌شود که نمودارهای CH3 و CH4 در کل بازه 2/25 mm -0 تقریبا برهم منطبق هستند که این با معنی‌دار نبودن اختلاف قطر میانگین آنها همخوانی دارد. همان‌طور که در جدول 2 مشاهده می‌شود، از نظر اندازه حباب‌ها، CH1 بیشترین شباهت را به شکلات تجاری دارد که این امر می‌تواند به دلیل وجود شکر در هر دو شکلات باشد. همان‌طور که پیشتر گفته شد، در محصولات حباب‌دار، ذرات جامد، به‌ویژه شکر، نقش فاز پیوسته را ایفا می‌کنند. بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق، به نظر می‌رسد که نقش شکر در این زمینه به مراتب چشمگیرتر از سایر ذرات جامد است، به‌طوری که اینولین و مالتودکسترین، به‌ویژه در نسبت‌های 25:75 و 75:25، نتوانسته‌اند نقش فاز پیوسته را به‌خوبی ایفا کنند.

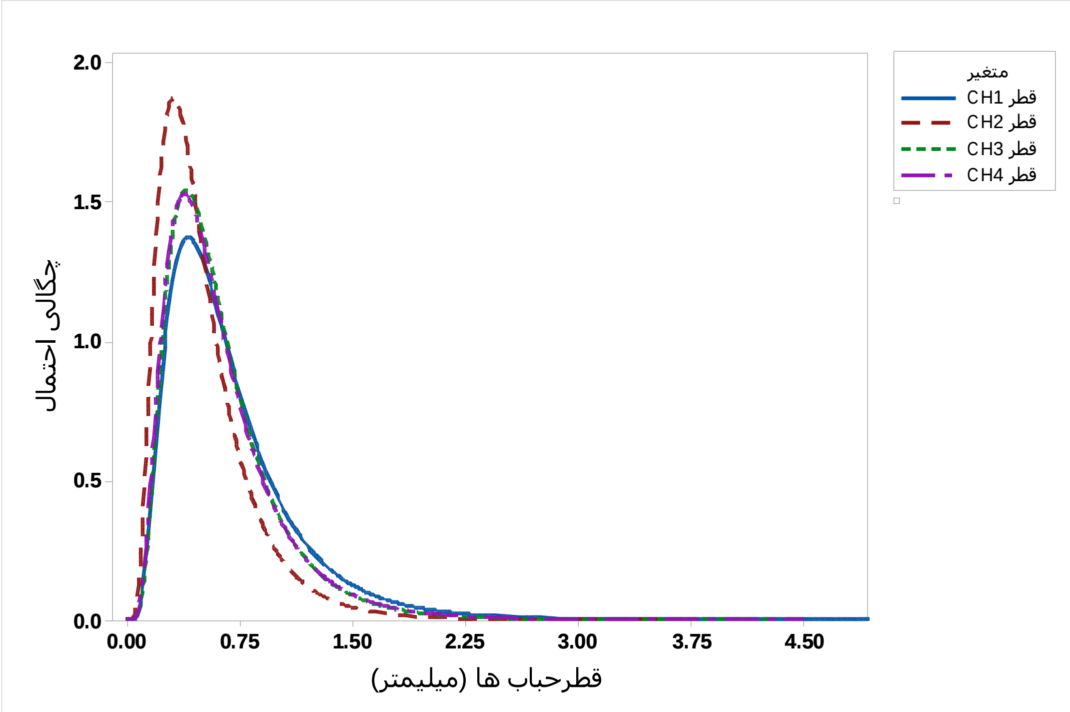
نسبت سطح به حجم حباب‌ها نیز در جدول 2 نشان داده شده است. هر قدر اندازه یک ذره کوچکتر باشد، نسبت سطح به حجم آن بیشتر است؛ بنابراین، همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، نسبت سطح به حجم حباب‌ها در CH2 و CH1 به‌ترتیب بیشینه و کمینه بود. انتظار می‌رفت که این نسبت در CH1 بیشتر از شکلات تجاری باشد ولی عکس آن اتفاق افتاد. این می‌تواند به دلیل حجم گاز بیشتر موجود در شکلات تجاری باشد؛ زیرا هر قدر مقدار گاز موجود در یک محصول بیشتر باشد، حباب‌های موجود در آن چندوجهی‌ترند و کرویت کمتری دارند (کمپبل و موگوت، 1999) که همین امر سبب افزایش مساحت سطحی آنها می‌شود؛ در نتیجه، نسبت سطح به حجم آنها افزایش می‌یابد

11 Coalescence



شکل 3- مراحل پردازش تصاویر: الف) تصویر اولیه، ب) تصویر نرمال شده، پ) تصویر حاصل از فیلتر لاپلاس، ت) تصویر حاصل تفریق پ از ب، ث) تصویر دودویی حاصل از روش آستانه‌یابی تطبیقی (مرز اولیه) و ج) تصویر دودویی نهایی حاصل از روش چان-وز.

(در تمام تصاویر به‌ترتیب از راست به چپ: شکلات تجاری، شکلات تجاری، CH4، CH3، CH2 و CH1).



شکل 4- توزیع اندازه حباب های نمونه های شکلات

(به دلیل تفاوت چشمگیر نمودار چگالی احتمال شکلات تجاری با نمودار های فوق، از رسم آن خودداری شده است).

جدول 2- ویژگی های حباب های نمونه های شکلات که از تصویر سه بعدی دودویی حاصل از روش چان-وز استخراج شده‌اند.

درصد جایگزینی اینولین	تعداد حباب های شناسایی شده	لگاریتم طبیعی* قطر حباب ها	D_{10} (mm)	D_{50} (mm)	D_{90} (mm)	حجم کل (mm^3)	نسبت سطح به حجم (mm^{-1})
صفر	1188	-0/53± 0/017[b]	0/23	0/58	1/28	540/74	10/11± 0/10[d]
25	215	-0/82± 0/039[d]	0/23	0/38	0/99	32/90	12/43± 0/19[a]
50	1639	-0/61± 0/014[c]	0/23	0/53	1/12	331/62	11/26± 0/07[b]
75	665	-0/62± 0/022[c]	0/23	0/53	1/10	131/52	11/34± 0/11[b]
شکلات تجاری	5769	-0/47± 0/008[a]	0/31	0/60	1/34	-**	10/50± 0/04[c]

* داده‌ها به صورت خطای معیار ± میانگین گزارش شده‌اند. حروف متفاوت در هر ردیف نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار می‌باشند.

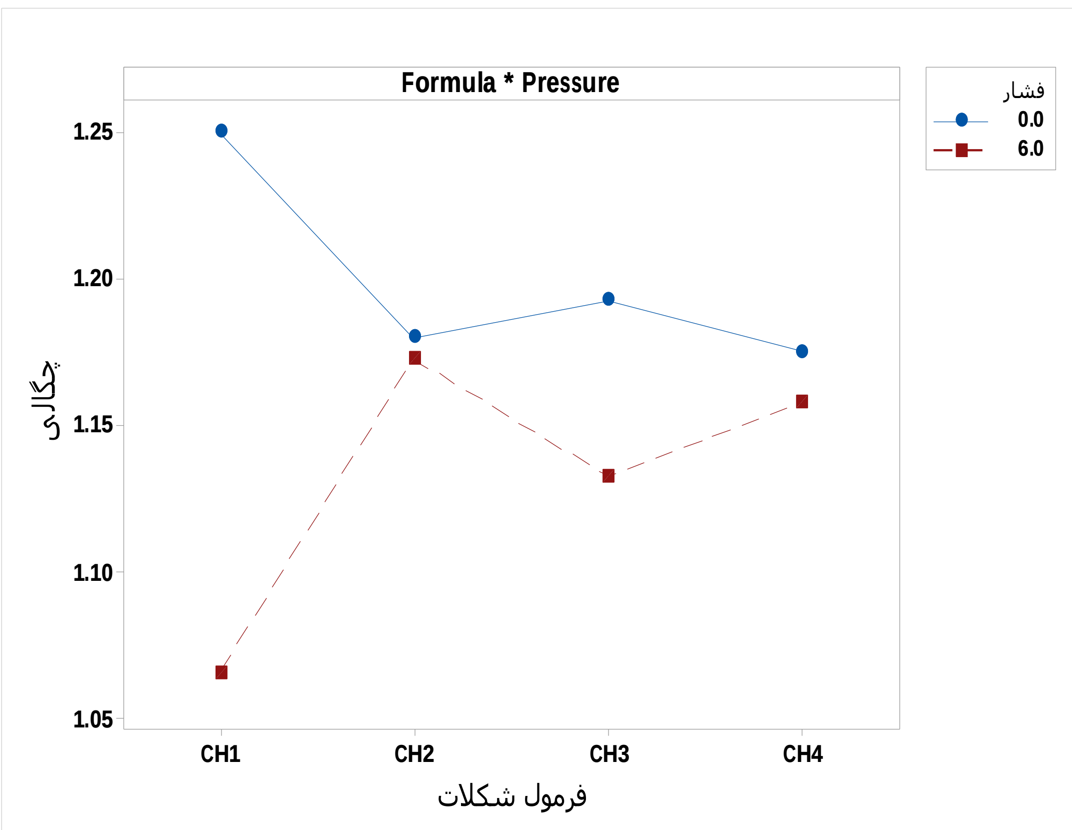
** دلیل گزارش نکردن حجم کل حباب‌های شکلات تجاری تفاوت حجم کل این شکلات با سایر شکلات‌ها می‌باشد.

اثر درصد جایگزینی اینولین و فشار گاز بر چگالی شکلات

اثر متغیرهای مستقل بر روی چگالی شکلات با استفاده از مدل خطی عمومی مورد بررسی قرار گرفت. تجزیه و تحلیل واریانس نشان داد که اثر اصلی هر دو متغیر به علاوه اثر متقابل بین آنها در سطح اطمینان 95% بر روی چگالی شکلات معنی دار بود. میزان ضریب تبیین (R^2)، ضریب تبیین تطبیق یافته (R^2-adj)) و ضریب تبیین پیش‌بینی شده (R^2-pred) برای مدل برازش شده به‌ترتیب برابر 92/63، 90/48 و 86/89 بود که نشانی از توانایی بالای مدل در برازش داده‌ها می‌باشد. همان‌طور که می‌دانیم، با افزایش عبارت‌های مدل میزان R^2 نیز افزایش می‌یابد؛ به همین دلیل، معمولا علاوه بر این ضریب، R^2-adj نیز گزارش می‌شود که تعداد عبارت‌های مدل اثری بر مقدار آن ندارد. همچنین R^2-pred نیز نشان‌دهنده توانایی مدل برای پیش‌بینی تیمارهایی است که آزمایش نشده‌اند. مناسب بودن مدل هم به بالا بودن این ضرایب و هم به نزدیک بودن مقدار آنها بستگی دارد. به علاوه، عدم برازش

این مدل نیز در سطح اطمینان 95% معنی‌دار نبود (p= 0/123) که این نیز نشان‌دهنده مناسب بودن مدل می‌باشد.

اثر متقابل متغیرهای مستقل بر روی چگالی شکلات در شکل 5 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، چگالی CH1 به مراتب بیشتر از سه شکلات بدون شکر است که این به دلیل چگالی بیشتر شکر ($1/59\ g/cm^3$) نسبت به اینولین ($1/31\ g/cm^3$) و مالتودکسترین ($1/44\ g/cm^3$) می‌باشد. با توجه به بیشتر بودن چگالی مالتودکسترین نسبت به اینولین، انتظار می‌رفت که چگالی CH2 بیشتر از CH3 باشد ولی عکس آن مشاهده شد. این می‌تواند به دلیل بلورینگی بیشتر CH3 نسبت به دو شکلات رژیمی دیگر باشد. این طور به‌نظر می‌رسد که اینولین و مالتودکسترین در نسبت 50:50 بلورهایی تشکیل داده‌اند که در جرم ثابت، حجم کمتری را اشغال کرده‌اند و در نتیجه، چگالی CH3 را در مقایسه با CH2 افزایش داده‌اند. همچنین، مشاهده می‌شود که در تمام شکلات‌ها چگالی شکلات حباب‌دار کمتر از شکلات بدون حباب است؛ زیرا بخشی از مواد جامد و چربی با گاز دی‌اکسید کربن جایگزین شده است. نکته حائز اهمیت چگالی به مراتب کمتر CH1 حباب‌دار در مقایسه با سه شکلات حباب‌دار بدون شکر است. این نشان می‌دهد که CH1 در نگهداری گاز بسیار تواناتر از شکلات‌های دیگر بوده است که دلیل آن را می‌توان به حضور شکر در این شکلات و بلورینگی بیشتر آن نسبت داد. در مورد شکلات‌های بدون شکر نیز مشاهده می‌شود که چگالی CH3 کمتر از دو نمونه دیگر است. این نتایج با مشاهدات و نتایج حاصل از پردازش تصویر همخوانی دارند. ملاحظه می‌شود که حجم کل حباب‌ها در CH1 به مراتب بیشتر از نمونه‌های بدون شکر است (جدول 2) که این نشان‌دهنده چگالی کمتر CH1 حباب‌دار نسبت به سایر نمونه‌ها است. در بین نمونه‌های رژیمی نیز حجم کل حباب‌های CH3 از دو نمونه دیگر بیشتر است که این نتیجه نیز نشان‌دهنده توانایی بیشتر این نمونه در نگهداری گاز و چگالی پایین‌تر آن است. چگالی شکلات تجاری برابر $0/80\pm 0/03\ g/cm^3$ بود که به مراتب کمتر از چگالی نمونه‌های این تحقیق می‌باشد. این هم می‌تواند به دلیل فرمول متفاوت آن و هم میزان گاز بیشتر موجود در آن باشد.



شکل 5- اثر متقابل درصد جایگزینی اینولین و فشار گاز بر روی چگالی شکلات

اثر درصد جایگزینی اینولین و فشار گاز بر سختی شکلات

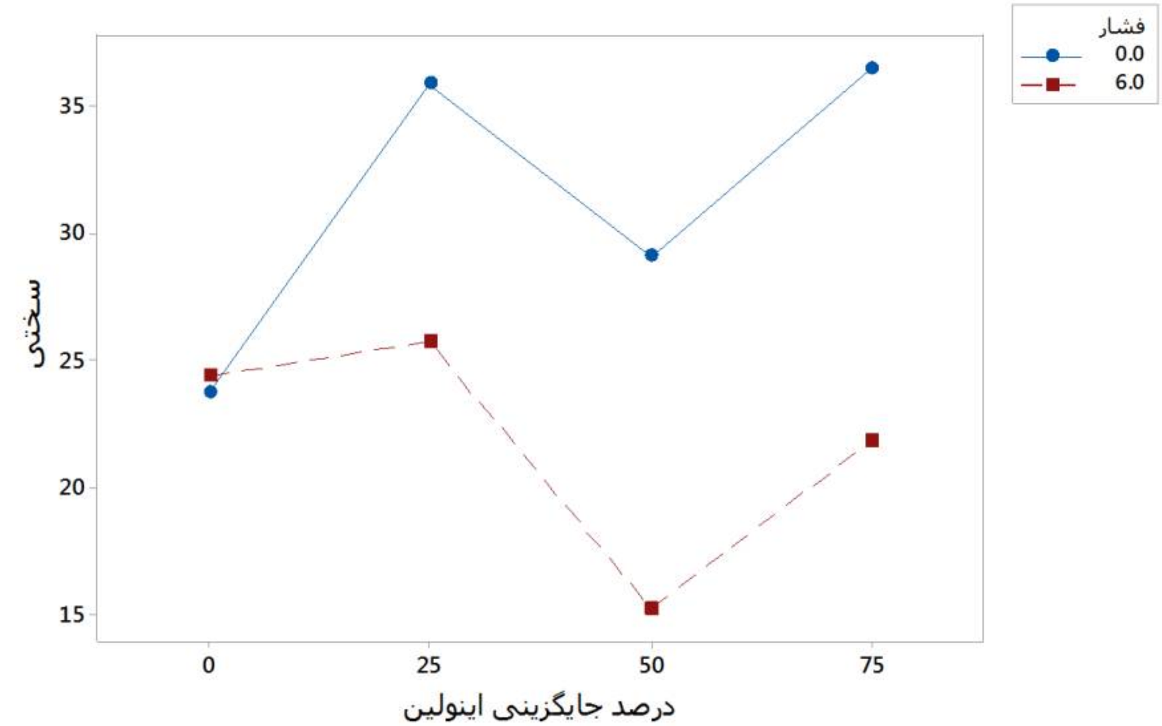
تجزیه و تحلیل واریانس نشان داد که هم اثر اصلی متغیرهای مستقل و هم اثر متقابل بین آنها در سطح اطمینان 95% بر روی سختی شکلات معنی‌دار بود. میزان R^2، R^2-adj و R^2-pred برای مدل برازش شده به‌ترتیب برابر 76/04، 73/04 و 68/70 بود که نمایانگر توانایی قابل قبول مدل در برازش داده‌ها می‌باشد. به علاوه، معنی‌دار نشدن احتمال عدم برازش (p=0/092) نیز نشانه دیگری از شایستگی مدل می‌باشد.

اثر متقابل متغیرهای مستقل بر روی سختی شکلات در شکل 6 نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که جایگزینی شکر با اینولین و مالتودکسترین باعث افزایش سختی شکلات شد. CH4 از سایر نمونه ها سخت‌تر بود که می‌تواند به دلیل بالاتر بودن شدت تجمیع ذرات جامد[12] آن باشد. این مشابه نتیجه Aidoo و همکاران (2014) است که ادعا کردند که نمونه‌های شکلات حاوی 75% اینولین: 25% پلی دکستروز شدت تجمیع ذرات جامد بیشتری نسبت به نمونه‌هایی داشت که حاوی 50% اینولین: 50% پلی دکستروز بود. Belščak-Cvitanović و همکاران (2015) بیان کردند که سختی شکلات همبستگی مستقیمی با میانه اندازه ذرات دارد. مطالعات قبلی به افزایش اندازه ذرات شکلات با افزایش میزان اینولین اشاره کرده اند (Shourideh *et al*,. 2012; Aidoo *et al*,. 2014; Konar *et al*,. 2014; Bitaraf *et al*,. 2016). از این رو، سختی بیشتر CH4 را می‌توان به ذرات درشت‌تر آن نسبت داد. Konar و همکاران (2014) همچنین مشاهده کردند که سختی شکلات سفید سیمبیوتیک پس از افزودن اینولین افزایش یافت و آن را به محتوای کل مواد جامد شکلات نسبت دادند که به خاطر افزودن اینولین بوده است. Aidoo و همکاران (2017) دریافتند که افزایش میزان اینولین موجب افزایش سختی شکلات تلخ بدون شکر شد؛ اگرچه تفاوت‌ها معنی‌دار نبودند. برخی مطالعات نیز به اثر بی‌معنی اینولین بر سختی شکلات اشاره کرده‌اند (Shah *et al*,. 2010; Furlán *et al*,. 2017; Konar *et al*,. 2017). در عین حال، برخی دیگر به کاهش سختی شکلات با افزایش اینولین اشاره کرده‌اند (Shourideh *et al.*, 2012; Konar *et al.*, 2014; Rezende *et al.*, 2015). Bitaraf و همکاران (2013) به کاهش سختی شکلات تلخ بدون شکر با افزایش مالتودکسترین اشاره کردند و جاذب رطوبت بودن این ماده را به عنوان دلیلی برای این مشاهده عنوان کردند. سختی کمتر CH1 نسبت به نمونه‌های بدون شکر را می‌توان به چگالی بیشتر شکر نسبت به اینولین و مالتودکسترین نسبت داد که موجب کاهش جزء حجمی ذرات جامد در CH1 شد. این ممکن است منجر به کاهش شدت تجمیع ذرات جامد و تراکم کمتر در ساختار CH1، و در نتیجه، بافت نرم‌تر شده باشد. پیش‌بینی می‌شد که سختی نمونه‌های حبابدار کمتر از نمونه‌های بدون گاز باشد که این پدیده در مورد شکلات‌های بدون شکر مشاهده شد. دلیل آن نیز جایگزینی بخشی از مواد جامد و چربی شکلات با گاز است که سبب نرم‌تر شدن آن شده است. نکته جالب توجه بالاتر بودن سختی CH1 حبابدار از نمونه بدون گاز است. دلیل این مشاهده را نیز، همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، می‌توان به حضور شکر در این نمونه نسبت داد؛ زیرا در محصولات حبابدار، ذرات جامد، به‌ویژه شکر، یک اسکلت پیوسته را تشکیل می‌دهند و همان نقشی را ایفا می‌کنند که چربی در محصولات بدون حباب بازی می‌کند (Peters, 2017). این‌گونه به‌نظر می‌رسد که اسکلت شکری در این محصول سبب شده است که سختی CH1 حبابدار اندکی بیشتر از نمونه بدون گاز شود. در عین حال، با توجه به اینکه چنین پدیده‌ای در نمونه‌های بدون شکر مشاهده نشد، می‌توان نتیجه گرفت که جایگزین‌های شکر نتوانسته‌اند نقش فاز پیوسته را به‌خوبی شکر در این محصولات ایفا کنند.

میانگین سختی شکلات تجاری 2/37 ± 7/66 نیوتن به‌دست آمد که از سختی نمونه‌های مورد بررسی در این تحقیق بسیار کمتر است. دلیل این را هم می‌توان به تفاوت در فرمول شکلات‌ها و هم به میزان گاز بیشتر شکلات تجاری نسبت داد. از آنجایی که در شکلات تجاری از کره کاکائو و در شکلات‌های این مطالعه از جایگزین کره کاکائو استفاده شده است، نرم‌تر بودن بودن شکلات تجاری نسبت به این شکلات‌ها قابل پیش‌بینی بود. در ضمن، همان‌طور که از نتایج پردازش تصویر و اندازه‌گیری چگالی بر می‌آید، میزان گاز موجود در شکلات تجاری بیشتر بود که این نیز به نوبه‌خود می‌تواند دلیل دیگری برای سختی کمتر این شکلات باشد.

---

12 Solids packing intensity



شکل 6- اثر متقابل درصد جایگزینی اینولین و فشار گاز بر روی سختی شکلات

نتیجه‌گیری

نتـایج ایـن پـژوهش نشـان دادنـد کـه روش چـان-وز در مقایسـه بـا روش تطبیقـی، از توانـایی بـالاتری در تقطیـع تصـویر برخـوردار اسـت؛ زیـرا ایـن روش وابسـته بـه گرادیـان نیسـت و بـه‌خصـوص بـرای تقطیـع تصـاویری مناسـب اسـت کـه مرزهـای مشخصی ندارند. همچنین، نتایج پـراش اشـعه X نشـان دادنـد کـه CH3 سـاختار متبلـورتری نسـبت بـه دو نمونـه بـدون شـکر دیگـر داشـت کـه دلیـل آن را مـی‌تـوان بـه بـرهمکنش احتمـالی بـین اینولین و مالتودکسـترین بـا یکـدیگر یـا بـا سـایر اجـزای شـکلات نسبت داد. توزیع اندازه حبـاب‌هـای شـکلات‌هـای مـورد بررسـی در ایـن مطالعـه بـه صـورت لـوگ-نرمـال بـود و میـانگین قطـر حبـاب‌هـای CH1 بیشـتر از سـایر نمونـه‌هـا بـود کـه دلیـل آن را مـی‌تـوان بـه بـه‌هـم پیوسـتن حبـاب‌هـای کوچـک و تشـکیل حباب‌هـای بزرگتـر در ایـن نمونـه نسـبت داد. همچنـین، مشـاهده شـد کـه در تمـام شـکلات‌هـا، چگـالی شـکلات حبابـدار کمتـر از شکلات بدون حباب اسـت. نتـایج انـدازه‌گیـری سـختی نیـز نشـان داد که نمونـه‌هـای بـدون شـکر حبابـدار از نمونـه‌هـای بـدون گـاز نرمتر بودند ولی در مورد CH1 عکس این پدیده مشاهده شد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد به‌خاطر حمایت مالی از این طرح پژوهشی با شماره 39888 تقدیر به‌عمل آورند. بخشی از محاسبات این تحقیق در مرکز محاسبات سنگین دانشگاه فردوسی مشهد، انجام شد که بدین وسیله تشکر می‌شود.

منابع

Afoakwa, E. O., Paterson, A., & Fowler, M. (2007). Factors influencing rheological and textural qualities in chocolate– a review. *Trends in Food Science & Technology*, 18(6), 290-298.

Aidoo, R. (2015). Functionality of inulin and polydextrose in stevia or thaumatin sweetened dark chocolate. (PhD thesis), Ghent University, Belgium.

Aidoo, R. P., Afoakwa, E. O., & Dewettinck, K. (2014). Optimization of inulin and polydextrose mixtures as sucrose replacers during sugar-free chocolate manufacture–Rheological, microstructure and physical quality characteristics. *Journal of Food Engineering*, 126, 35-42.

Aidoo, R. P., Appah, E., Van Dewalle, D., Afoakwa, E. O., & Dewettinck, K. (2017). Functionality of inulin and polydextrose as sucrose replacers in sugar-free dark chocolate manufacture–effect of fat content and bulk mixture concentration on rheological, mechanical and melting properties. *International Journal of Food Science & Technology*, 52(1), 282-290.

Aidoo, R. P., Depypere, F., Afoakwa, E. O., & Dewettinck, K. (2013). Industrial manufacture of sugar-free chocolates–applicability of alternative sweeteners and carbohydrate polymers as raw materials in product development. *Trends in Food Science & Technology*, 32(2), 84-96.

Bellido, G. G., Scanlon, M. G., Page, J. H., & Hallgrimsson, B. (2006). The bubble size distribution in wheat flour dough. *Food Research International*, 39(10), 1058-1066.

Belščak-Cvitanović, A., Komes, D., Dujmović, M., Karlović, S., Biškić, M., Brnčić, M., & Ježek, D. (2015). Physical, bioactive and sensory quality parameters of reduced sugar chocolates formulated with natural sweeteners as sucrose alternatives. Food Chemistry, 167, 61-70.

Bitaraf, S., Abbasi, S., & HAMIDI, E. Z. (2016). Effects of inulin and bulking agents on rheological properties and particle size distribution of low calorie dark chocolate.

Bitaraf, S., Abbasi, S., & Hamidi, Z. (2013). Production of low-energy prebiotic dark chocolate using inulin, polydextrose, and maltodextrin. *Iranian Journal of Nutrition Sciences & Food Technology*, 8(1), 49-62.

Bradley, D., & Roth, G. (2007). Adaptive thresholding using the integral image. *Journal of graphics tools*, 12(2), 13-21.

Campbell, G. M., & Mougeot, E. (1999). Creation and characterisation of aerated food products. *Trends in Food Science & Technology*, 10(9), 283-296.

Chan, T. F., & Vese, L. A. (2001). Active contours without edges. *IEEE Transactions on image processing*, 10(2), 266-277.

Chiotellis, E., & Campbell, G. M. (2003). Proving of bread dough I: modelling the evolution of the bubble size distribution. Food and Bioproducts Processing, 81(3), 194-206.

Erdem, Ö., Gültekin-Özgüven, M., Berktaş, I., Erşan, S., Tuna, H. E., Karadağ, A.,. Cutting, S. M. (2014). Development of a novel synbiotic dark chocolate enriched with Bacillus indicus HU36, maltodextrin and lemon fiber: Optimization by response surface methodology. *LWT-Food Science and Technology*, 56(1), 187-193.

Falcone, P., Baiano, A., Zanini, F., Mancini, L., Tromba, G., Montanari, F., & Del Nobile, M. (2004). A novel approach to the study of bread porous structure: phase-contrast X-ray microtomography. *Journal of Food Science-Chicago-*, 69(1), FEP38-FEP38.

Farzanmehr, H., & Abbasi, S. (2009). Effects of inulin and bulking agents on some physicochemical, textural and sensory properties of milk chocolate. *Journal of texture studies*, 40(5), 536-553.

Furlán, L. T. R., Baracco, Y., Lecot, J., Zaritzky, N., & Campderrós, M. E. (2017). Influence of hydrogenated oil as cocoa butter replacers in the development of sugar-free compound chocolates: Use of inulin as stabilizing agent. *Food Chemistry*, 217, 637-647.

Glicerina, V., Balestra, F., Dalla Rosa, M., & Romani, S. (2013). Rheological, textural and calorimetric modifications of dark chocolate during process. *Journal of Food Engineering*, 119(1), 173-179.

Granato, D., de Araújo Calado, V. M., & Jarvis, B. (2014). Observations on the use of statistical methods in Food Science and Technology. *Food Research International*, 55(0), 137-149. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2013.10.024

Haedelt, J. (2005). An investigation into bubble inclusion into liquid chocolate. The University of Reading.

Haedelt, J., Beckett, S., & Niranjan, K. (2007). Bubble-Included Chocolate: Relating Structure with Sensory Response. *Journal of Food Science*, 72(3), E138-E142.

Haedelt, J., Pyle, D. L., Beckett, S. T., & Niranjan, K. (2005). Vacuum-induced Bubble Formation in Liquid-tempered Chocolate. *Journal of Food Science*, 70(2), E159-E164.

Konar, N., Özhan, B., Artık, N., Dalabasmaz, S., & Poyrazoglu, E. S. (2014). Rheological and physical properties of inulin-containing milk chocolate prepared at different process conditions. *CyTA-Journal of Food*, 12(1), 55-64.

Konar, N., Palabiyik, İ., Toker, O. S., Polat, D. G., Sener, S., Akcicek, A., & Sagdic, O. (2017). Effect of Inulin DP on Various Properties of Sugar-Free Dark Chocolates Containing Lactobacillus paracasei and Lactobacillus acidophilus. *International Journal of Food Engineering*, 13(9).

Massey, A., Khare, A., & Niranjan, K. (2001). Air inclusion into a model cake batter using a pressure whisk: development of gas hold-up and bubble size distribution. *Journal of Food Science*, 66(8), 1152-1157.

Misra, N., Phalak, R., & Martynenko, A. (2018). A microscopic computer vision algorithm for autonomous bubble detection in aerated complex liquids. Journal of Food Engineering, 238, 54-60.

Niranjan, K., & Silva, S. (2008). Bubble-containing foods Food Materials Science (pp. 281-303): Springer.

Pandey, A., & Singh, G. (2011). Development and storage study of reduced sugar soy containing compound chocolate. *Journal of food science and technology*, 48(1), 76-82.

Peters, D. J. (2017). Non-conventional machines and processes. Beckett's Industrial Chocolate Manufacture and Use, 400-430.

Rezende, N. V., Benassi, M. T., Vissotto, F. Z., Augusto, P. P., & Grossmann, M. V. (2015). Mixture design applied for the partial replacement of fat with fibre in sucrose-free chocolates. *LWT-Food Science and Technology*, 62(1), 598-604.

Shah, A. B., Jones, G. P., & Vasiljevic, T. (2010). Sucrose-free chocolate sweetened with Stevia rebaudiana extract and containing different bulking agents–effects on physicochemical and sensory properties. International Journal of Food Science & Technology, 45(7), 1426-1435.

Shoaib, M., Shehzad, A., Omar, M., Rakha, A., Raza, H., Sharif, H. R., Niazi, S. (2016). Inulin: Properties, health benefits and food applications. Carbohydrate Polymers, 147, 444-454.

Shourideh, M., Taslimi, A., Azizi, M., & Mohammadifar, M. (2012). Effects of D-Tagatose and inulin on some physicochemical, rheological and sensory properties of dark chocolate. International Journal of Bioscience, *Biochemistry and Bioinformatics*, 2(5), 314.

Sokmen, A., & Gunes, G. (2006). Influence of some bulk sweeteners on rheological properties of chocolate. LWT-Food Science and Technology, 39(10), 1053-1058.

Watson, N, Hazlehurst, T, Povey, M, Vieira, J, Sundara, R, & Sandoz, JP. (2014). Can airborne ultrasound monitor bubble size in chocolate, *Paper presented at the Journal of Physics:* Conference Series.

Winkelmeyer, C. B., Peyronel, F., Weiss, J., & Marangoni, A. G. (2016). Monitoring Tempered Dark Chocolate Using Ultrasonic Spectrometry. *Food and Bioprocess Technology*, 9(10), 1692-1705. doi:10.1007/s11947-016-1755-5

Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 16, No. 5, Dec- Jan 2021, p. 525-540

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد 16، شماره 5، آذر - دی 1399، ص. 540-525

Production of aerated chocolate and application of X-ray computed tomography and image processing in evaluating the bubbles features

M. Sarfarazi[1], M. Mohebbi[2]*, M. Saadatmand-Tarzjan[3], A. Mirshahi[4]

Received: 2019.10.28
Accepted: 2019.11.09

Introduction: Chocolate is a suspension of solid particles, including sugar, cocoa solids and milk powder (depending on the chocolate type) in a continuous fat phase, namely cocoa butter or its substitutes. The solid particles account for approximately 70% of chocolate with the fat constituting about 30%. Sugar takes up nearly 40–50% of the total solid particles of chocolate, thus influencing its sweetness, particle size distribution, rheological and sensory properties. It is also considered to be a bulking agent and a source of energy which produces 394 kcal/100 g of refined sugar. Therefore, consumers are increasingly becoming concerned with chocolate sugar and calorie content nowadays. This issue can be resolved by replacing sugar with bulk (nutritive) sweeteners and/or dietary fibers. Bubbles are found in many food products, including cakes, chocolates and beverages. Although they do not increase the food nutritional value, they change its textural properties and mouthfeel. Bubbles are normally visible to the naked eye and their mean diameter ranges from 0.05 to 3 mm. X-ray computed tomography is a 3D imaging technique which captures the images of a sample cross-sections. It is used for the non-destructive visualization and characterization of food microstructure. In this method, a series of radiographs of a sample are captured from different angles to be utilized for the 3D reconstruction of the material microstructure.

Materials and methods: sugar was replaced with inulin: maltodextrin mixture at ratios of 25:75 (CH2), 50:50 (CH3) and 75:25 (CH4). Carbon dioxide was injected into the samples at 6 bar to produce aerated chocolate. Using X-ray computed tomography, the images of the samples were captured and after processing, the obtained images were segmented using the Chan-Vese method. The properties of bubbles included total volume, diameter and surface to volume ratio. The crystallinity of the samples was determined through X-ray diffraction. The hardness of the chocolate bars was measured using the puncture test. The density of the aerated chocolates was also compared with that of the nonaerated ones.

Results and discussion: X-ray diffraction revealed that there were many strong peaks in the diffractogram of CH1, which can be ascribed to the high degree of sugar crystallinity in addition to the impurities present in the commercial sugar utilized in this study. In the case of the sugar-free samples, namely CH2, CH3 and CH4, two distinct peaks could be seen at 2θ of about 21° and 23.5°, both of which were much stronger and more defined in the scattering pattern of CH3, demonstrating the more crystalline structure of this sample. It seems that inulin and maltodextrin have physically interacted with each other or with the other ingredients of the chocolate, in particular CBS, which has been more pronounced at the ratio of 50:50. The results of image segmentation showed that the Chan-Vese method, compared with the adaptive thresholding one, was more able to segment the images, because this method does not depend on the image gradient and is especially suitable for the objects with vague edges. The mean bubble diameter of CH1 was bigger than that of the other samples, which could be due to its higher degree of crystallinity, because the crystalline structure of CH1 prevented the gas from being lost leading to the coalescence of smaller bubbles and the formation of bigger ones. In addition, it was observed that the density of the aerated chocolate was higher than that of the unaerated one in all the formulas as a portion of solid particles and fat was replaced with the gas. The results also demonstrated that the sugar-free aerated samples were softer than the corresponding nonaerated ones. However, it was reversed in the case of CH1

1. PhD student, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
2. Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
3. Associate professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, , Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
4. Associate professor, Department of Clinical Sciences, Faculty of Veterinary Medicine, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
(* Corresponding author. E-mail: mohebbatm@gmail.com)

which could be ascribed to the presence of sugar in this sample, because in aerated products, solid particles, particularly sugar, form a continuous skeleton and play the same role as fat does in nonaerated products.

Keywords: Inulin; Maltodextrin; X-ray computed tomography; X-ray diffraction; Chan-Vese; Hardness.